

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej **mgr inż. Agnieszki NALBORCZYK-KAZANECKIEJ**
Tytuł rozprawy: **Wpływ czynników technologicznych i materiałowych na właściwości i jakość złączy spawanych metodami wysokoenergetycznymi ze stali 17-4PH oraz stopu niklu Inconel 718**

Formalna podstawa recenzji

Podstawę formalną opracowania przedmiotowej recenzji, stanowiła Uchwała Nr 3/11/2023/RDIMat Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 15 listopada 2023 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej i przedstawiona w skierowanym do mnie piśmie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Macieja Motyki. Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Grażyny Mrówki-Nowotnik, prof. PRz, przy udziale promotora pomocniczego – dr inż. Marcina Zawadzkiego (Pratt & Whitney Rzeszów S.A.)

Aktualność podjętego tematu

Spawanie złączy ze stali 17-4PH i stopu niklu Inconel 718 stanowi techniczne wyzwanie, związane z różnicami w składzie chemicznym, właściwościami termicznymi i strukturalnymi tych materiałów. W szczególności stal 17-4PH jest wrażliwa na pęknięcia spawalnicze, zwłaszcza jeśli nie jest prawidłowo obrabiana cieplnie po spawaniu. Wymaga odpowiedniej obróbki cieplnej, takiej jak hartowanie i starzenie, aby uzyskać optymalną wytrzymałość i właściwości mechaniczne. W związku z tym istnieje ryzyko wystąpienia różnych rodzajów pęknięć, takich jak pęknięcia gorące, zimne lub pęknięcia podczas krzepnięcia. Z kolei w wyniku spawania stopu niklu Inconel 718, może dochodzić do tworzenia się faz międzymetalicznych, które mogą wpływać na właściwości mechaniczne i odporność na korozję złącza. stop niklu Inconel 718 może być wrażliwy na utlenianie w wyniku procesu spawania, co może wpływać na jego odporność na korozję w niektórych obszarach. W wyniku procesu spawania mogą zachodzić zmiany w strukturze mikro- i makrostrukturalnej, które będą wpływać na właściwości termiczne materiału co z kolei przełoży się na końcową jakość złącza. Spawanie złączy ze stali 17-4PH i stopu niklu Inconel 718 wymaga odpowiedniego dostosowania parametrów spawalniczych, takich jak prąd, napięcie, prędkość spawania, jest kluczowe aby uniknąć deformacji, zmian w strukturze ziarna i utraty właściwości mechanicznych. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości spoiny po spawaniu występuje konieczność stosowania odpowiedniej obróbki cieplnej zarówno dla stali 17-4PH, jak i Inconel

718. W celu sprawdzenia integralności spoiny niezbędne jest przeprowadzenie odpowiednich testów nieniszczących, takich jak testy ultradźwiękowe lub radiograficzne czy niszczących takich jak badania mikrostruktury czy właściwości mechanicznych. Ważne jest, aby proces spawania w zależności od przyjętej metody był prowadzony z uwzględnieniem specyfiki każdego ze stopów, a wszelkie parametry i warunki procesowe były dostosowane do minimalizacji potencjalnych problemów. Ponadto, testy jakości, kontrole nieniszczące i właściwa obróbka cieplna są kluczowe dla uzyskania trwałych i wytrzymałych złączy spawanych. Podsumowując, zrozumienie i kontrola wpływu czynników technologicznych i materiałowych są kluczowe dla osiągnięcia optymalnych właściwości złączy spawanych, zarówno w kontekście badań naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej. Wpływ czynników technologicznych i materiałowych na jakość złączy spawanych metodami wysokoenergetycznymi, z takich materiałów jak stal 17-4PH oraz nadstop niklu Inconel 718, jest istotny zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.

W związku z powyższym tematykę opiniowanej pracy uważam za celową i aktualną z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają polskie i zagraniczne doniesienia literaturowe. Wyniki z pewnością znajdą zastosowanie w praktyce przemysłowej. Mocną stroną tematyki pracy jest jej badawczy charakter oraz potencjał aplikacyjny.

Zakres opiniowanej pracy

Struktura pracy składa się z siedmiu rozdziałów głównych, z których pierwsze trzy dotyczą badań literaturowych, natomiast kolejne pięć rozdziałów zawiera autorskie opracowanie tematu dysertacji. Recenzowana praca liczy 193 strony, jest bogato ilustrowana, zawiera 114 pozycji literatury.

Teoretyczna analiza stanu zagadnienia zawiera wprowadzenie, studium literatury oraz przedstawia stan zagadnienia w świetle analizowanej literatury oraz celu i zakresu pracy.

W literaturowej części pracy odniesiono się między innymi do problematyki spawania metodami wysokoenergetycznymi zastosowanymi w pracy. Autorka charakteryzuje spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego (TIG) i spawanie wiązką elektronów (EBW) to dwie różne metody spawania, które różnią się zarówno pod względem procesu, jak i zastosowań. Główna różnica wynika z rodzaju źródła ciepła. W metodzie TIG, źródłem ciepła jest łuk elektryczny, który tworzy się między elektrodą nietopliwą, a spawanym metalem. Elektroda dostarcza prąd elektryczny do obszaru spawania a dostarczenie energii do obszaru spawanego następuje poprzez gorący łuk elektryczny, który rozgrzewa i topi materiał spawany. W drugim przypadku źródłem ciepła jest wiązka elektronów, generowana poprzez przyśpieszenie elektronów do bardzo wysokich prędkości w polu elektrycznym. Energia jest wprowadzana przez wiązkę elektronów, które posiadają dużą ilość energii kinetycznej. W wyniku zderzeń elektronów z atomami materiału spawanego, energia jest przekazywana i powoduje lokalne rozgrzewanie.

Autorka analizuje zakres temperatur opisywanych technologii. Gdzie temperatura procesu w spawaniu TIG jest niższa w porównaniu do spawania wiązką elektronów, co sprawia, że metoda ta jest bardziej odpowiednia dla materiałów cieplnie wrażliwych. Z kolei spawanie wiązką elektronów generuje bardzo wysokie temperatury, co pozwala na głębokie przenikanie i szybkie schładzanie spoiny. Różnice między metodami występują ze względu na środowisko spawania. W metodzie TIG stosuje się gaz obojętny (często argon) jako osłonowy, aby chronić obszar spawania przed działaniem tlenu i azotu z otoczenia. W przypadku spawania wiązką elektronów nie jest konieczne stosowanie gazu osłonowego, ponieważ proces odbywa się w próżni, co eliminuje problem utleniania metali.

Autorka poprawnie i szczegółowo opisała kontekst dysertacji. Charakteryzując procesy warto zwrócić uwagę, że metoda TIG jest powszechnie stosowana w spawaniu stali nierdzewnej, aluminium, miedzi, a także w precyzyjnych spawaniach, gdzie wymagana jest wysoka kontrola nad procesem, natomiast EBW zazwyczaj stosuje się w zaawansowanych zastosowaniach, takich jak spawanie w przemyśle lotniczym, produkcji mikroelektroniki, czy produkcji komponentów dla przemysłu kosmicznego. Podsumowując, obie te metody oferują różne korzyści i są stosowane w zależności od specyfiki projektu, rodzaju materiału oraz wymagań co do jakości i precyzji spoiny.

W dalszej części opisu literaturowego Autorka szczegółowo analizuje materiały zastosowane w dysertacji. Opis stali odpornych na korozję zawiera ogólne informacje na ich temat w odniesieniu do problemów związanych z ich łączeniem za pomocą technologii spawania. W tej części wymieniono i sklasyfikowano gatunki stali odpornych na korozję ze względu na właściwości użytkowe. W szczególności w podrozdziałach odniesiono się do stali odpornych na korozję umacnianych wydzieleniowo, stali martenzytycznych umacnianych wydzieleniowo oraz stali nierdzewnej 17-4PH.

Osobny podrozdział poświęcono charakterystyce nadstopów niklu w którym Autorka omawia obróbkę cieplną nadstopu na osnowie niklu Inconel 718 oraz jego spawalność. W podrozdziałach dość szczegółowo potraktowano omówienie tego superstopu. Zwrócono uwagę, że posiada on wysoką odporność na działanie agresywnego środowiska korozyjnego przy zachowaniu wysokich właściwości mechanicznych z tego względu ten rodzaj materiału znajduje zastosowanie w przemyśle lotniczym na obciążone elementy silników lotniczych, takie jak komory spalania, elementy układów wydechowych, dopalaczy, łopatki czy obudowy pracujące w wysokiej temperaturze. Podzespoły tworzące komponenty silników lotniczych mogą występować w postaci odlewów zarówno monokrystalicznych jak i polikrystalicznych, a także blach, odkuwek czy prętów.

Cel i założenia pracy przedstawiono w sposób syntetyczny. Jasno i precyzyjnie określono cel pracy doktorskiej, którym było określenie wpływu różnych czynników: technologicznych procesowych oraz materiałowych na właściwości i jakość złączy spawanych wytworzonych metodami wysokoenergetycznymi EBW i TIG. Do zrealizowania założonego celu Autorka zaproponowała badania przy zastosowaniu dwóch metod spawania spawanie wiązką elektronów EBW oraz zrobotyzowanego spawania TIG. W celu weryfikacji jakości otrzymanych złączy spawanych zaproponowano badania NDT. Następnie po wytypowaniu

optymalnych parametrów spawania określono wpływ procesu spawania oraz stanu wyjściowego materiału spawanego na mikrostrukturę i właściwości wytrzymałościowe złączy spawanych. W ostatnim etapie złącza spawane zostaną poddane obróbce cieplnej stosowanej w celu nadania złączom spawanym finalnych właściwości mechanicznych. W dalszej części Autorka planuje kompleksowe badania nieniszczące NDT oraz pakiet badań niszczących w celu określenia wpływu poszczególnych etapów procesu produkcyjnego na jakość, mikrostrukturę i właściwości mechaniczne złączy spawanych.

Autorka sugeruje, że dzięki przeprowadzonym badaniom znajomość procesu spawania oraz materiałów IN718 oraz stali 17-4PH zostanie poszerzona. Wiedza ta zostanie wykorzystana w celu optymalizacji procesów produkcyjnych, poprawy jakości otrzymanych złączy co będzie wiązało się z redukcją kosztów poprzez eliminację złej jakości połączeń oraz podniesieniem standardu produkowanych części. Ponadto Autorka stwierdza, że przeprowadzone badania wpisują się w ważne wartości dla przedsiębiorstwa (Pratt&Whitney Rzeszów) w którym pracuje.

W części dotyczącej metodyki badań Autorka omawia przygotowanie próbek do badań oraz szczegółowo precyzuje program badań. W pracy realizowano badania dotyczące określenia wpływu czynników technologicznych i materiałowych na jakość, mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne połączeń spawanych z nadstopu na osnowie niklu IN718 oraz stali nierdzewnej 17-4PH. Proces spawania prowadzono przy zastosowaniu dwóch metod: spawanie wiązką elektronów (EBW) oraz spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego (TIG). W ramach określenia wpływu czynników technologicznych na jakość połączeń spawanych przeprowadzono badania dotyczące wpływu sposobu przygotowania łączonych elementów do procesu spawania, zanieczyszczenia spawanych powierzchni substancjami pochodzącymi z procesu produkcyjnego oraz wpływu różnych parametrów spawania stosowanych w procesach EBW i TIG. W pracy skoncentrowano się także na wykazaniu wpływu czynników materiałowych na jakość złączy spawanych. Badania obejmowały zbadanie stanu wyjściowego materiału spawanego (przesycony, starzony, przestarzony) oraz przeprowadzonej obróbki cieplnej na właściwości i jakość złączy spawanych.

W części opisującej wyniki badań Autorka udokumentowała przeprowadzone badania poprzez ich prezentację w formie tabel zdjęć i wykresów. Badania wpływu warunków procesu przygotowania do spawania obejmowały: zabrudzenie materiałów spawanych chłodziwem bezpośrednio przed procesem spawania oraz 2 tygodnie przed spawaniem, a także zabrudzenie spawanych elementów magnezją. Przeprowadzono także analizę wpływu parametrów spawania: prędkości spawania, prądu spawania, częstotliwości prądu pulsacyjnego oraz energii liniowej spawania, na jakość otrzymanych złączy. Zbadano także wpływ stanu wyjściowego stali 17-4PH: stan przesycony 1040°C, starzony (przesycanie 1040°C/1h + starzenie 550°C/4h) i przestarzony (przestarzenie 760°C/2h + 620°C/4h) oraz nadstopu na osnowie niklu IN718: przesycony 960°C i starzony (przesycanie 960°C/1h + starzenie 720°C/8h + 620°C/8h) na jakość złączy. Określono także wpływ „finalnej” obróbki cieplnej, składającej się z przesycania i starzenia, na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączeń spawanych.

Omówienie wyników badań prezentuje syntetyczną analizę przeprowadzonych badań. W szczególności Autorka stwierdza, że zanieczyszczenie chłodziwem i magnezją wpływa w znaczący sposób na pogorszenie jakości połączeń spawanych. Ustalono, że zastosowane parametry spawania mają także wpływ na jakość połączeń spawanych oraz na rozmiary otrzymanych spoin. Stan wyjściowy materiału, dla obydwu badanych materiałów niepoddanych „finalnej” obróbce cieplnej, wpływa na ich mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne. Najwyższe właściwości wytrzymałościowe $R_m = 1181\text{MPa}$, $R_{e0,2} = 893\text{MPa}$ wykazują złącza ze stali 17-4PH spawane w stanie przesyconym. Natomiast w przypadku nadstopu na osnowie niklu IN718 najwyższe właściwości wytrzymałościowe otrzymano dla złączy z próbek spawanych w stanie starzonym ($R_m = 996\text{MPa}$, $R_{e0,2} = 636\text{MPa}$). „Finalna”, jak to zostało określone w pracy, obróbka cieplna prowadzi do wyrównania właściwości wytrzymałościowych połączeń spawanych. W przypadku złączy ze stali 17-4PH oraz IN718 po „finalnej” obróbce cieplnej właściwości mechaniczne są zbliżone niezależnie od stanu wyjściowego materiału (przesycony, starzony, przestarzony).

W ostatniej części zawierającej wnioski, Autorka przystąpiła do syntetycznego podsumowania najistotniejszych informacji płynących z przeprowadzonych badań. Precyzyjny opis wniosków obejmuje zarówno aspekty o charakterze naukowym, jak i praktycznym, co nadaje temu etapowi pracy wyjątkową wartość. Przedstawione wnioski wykraczają poza jedynie zakończenie naukowe, rozszerzając się na obszar możliwości praktycznych, które mogą być zastosowane w technologii spawania, zarówno w przypadku Spawania Wiązką Elektronów (EBW), jak i Tungsten Inert Gas (TIG). Przedstawione wnioski są nie tylko syntetyczne, ale również spójne, co świadczy o ich starannym przygotowaniu. Autorka zdaje się doskonale zrozumieć zarówno kontekst teoretyczny, jak i praktyczny, co umożliwia jej ukierunkowanie wniosków na konkretne aspekty związane z technologią spawania EBW i TIG.

Uwagi redakcyjne

- Str. 81 Rys. 4.8 Brak oznaczenia grubości na rysunku.
- Str. 162/7 linijka od dołu. Jest „zatasowanie” powinno być: zastosowanie

Uwagi dyskusyjne

- Str. 68. Autorka pisze, że „Rozmiar próbek wynosił 2,5x12,7mm lub 5x12,7mm. Z próbek o większej szerokości wycięto próbki do statycznej próby rozciągania”. Proszę podać wymiary próbki i sposób mocowania w maszynie wytrzymałościowej.
- W tabeli 6.2 i 6.3 podano zależność szerokości lica spoiny od energii liniowej nie podano jednak wprost dla jakiego procesu. Z kontekstu można wnioskować, że chodzi proces TIG. Czy podobne zależności (tabele) istnieją dla procesu EBW.
- Na Rys. 6.9 zestawiono „...właściwości mechaniczne próbek spawanych...”. Jak wiadomo w złączy spawanym można wyróżnić przynajmniej trzy strefy o różnych właściwościach mechanicznych (np. Rys. 6.4). Dla którego obszaru wyznaczono granice plastyczności i jaką przyjęto metodologię do jej wyznaczenia.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawione przez Doktorantkę dane literaturowe dotyczą bezpośrednio problematyki, wpływu czynników technologicznych i materiałowych na właściwości i jakość złączy spawanych metodami wysokoenergetycznymi, rozważanej w pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z renomowanych czasopism.

Rozprawa doktorska w dużej mierze skupia się na wpływie parametrów spawania: prędkości spawania, prądu spawania, częstotliwości prądu pulsacyjnego oraz energii liniowej spawania, na jakość otrzymanych złączy.

Praca wystarczająco przedstawia zagadnienie badawcze zarówno od strony sformułowanych treści jak i formy rozprawy. Struktura rozprawy w moim przekonaniu jest prawidłowa. W rozprawie nie ustrzeżono się drobnych błędów edytorskich niewpływających w istotny sposób na czytelność i zrozumienie intencji Autora. Procedury badawcze użyte w pracy są w większości standardowe lub znormalizowane i przyjęte w pracy zgodnie z ich przeznaczeniem.

Za najmocniejszą stroną pracy uważam jej utylitarny charakter. Z punktu widzenia aplikacyjnego, najbardziej obiecujące są wyniki sugerujące, że zastosowanie „finalnej” obróbki cieplnej prowadzi do wyrównania właściwości wytrzymałościowych połączeń spawanych a stan wyjściowy materiału nie wpływa na ostateczne właściwości wytrzymałościowe.

Ważnym aspektem podsumowania jest zwrócenie uwagi na aspekty utylitarne. Autorka wydobywa praktyczne zastosowania płynące z uzyskanych wyników, ukazując ich potencjalne wykorzystanie w praktyce przemysłowej. To podejście sprawia, że praca nie ogranicza się jedynie do sfer naukowych, ale również wskazuje na konkretne korzyści, jakie mogą być osiągnięte w dziedzinie spawania EBW i TIG.

W konsekwencji, wnioski stanowią nie tylko zwieńczenie badawczego wysiłku, ale również otwierają perspektywę praktycznego stosowania zdobytej wiedzy. Ten kompleksowy charakter podsumowania czyni je istotnym elementem całej pracy naukowej, zapewniając zarówno pełną perspektywę wyników badań, jak i ich potencjalne implikacje dla przemysłu.

Postawiony cel pracy uważam za osiągnięty a założony zakres pracy za zrealizowany i w pełni udokumentowany.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Agnieszki NALBORCZYK-KAZANECKIEJ zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Doktorantka wykazała się należyłą wiedzą oraz umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i prezentacji wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że praca została zrealizowana przy dużym nakładzie pracy i środków związanych z wykonaniem badań. Wykonanie badań wymagało od Doktorantki znajomości teorii i praktyki badawczej z zakresu inżynierii materiałowej. Uzyskane wyniki mają unikalną wartość poznawczą i naukową, należy je uznać za wartościowe i w dużym stopniu jako oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy.

Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki NALBORCZYK-KAZANECKIEJ pt. „**Wpływ czynników technologicznych i materiałowych na właściwości i jakość złączy spawanych metodami wysokoenergetycznymi ze stali 17-4PH oraz stopu niklu Inconel 718,**” stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa.

Doktorantka osiągnęła założony cel wykazując się znajomością zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej, oraz nowoczesnej metodyki i technik badawczych. Zaprezentowała oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. **Wnioski wynikające z rozprawy stanowią oryginalny wkład naukowy autora w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa.**

W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki NALBORCZYK-KAZANECKIEJ w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późn. zm.).



.....
Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI
Politechnika Częstochowska
Częstochowa, 15.01.2024